

XeCl 准分子激光在铅蒸气中的 高效率受激电子喇曼散射

楼祺洪 辜红平

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文报道了采用非稳腔 XeCl 准分子激光泵浦铅蒸气获得 52% 喇曼能量转换效率。比较了稳腔与非稳腔 XeCl 激光泵浦下的喇曼转换特性。

关键词: 受激喇曼散射, 准分子激光。

一、引 言

准分子激光在金属蒸汽中的受激电子喇曼散射, 可以有效地从紫外光获得高功率的蓝绿激光^[1]。在钡、铅、铯等金属中, 铅金属蒸气的受激电子喇曼散射可获得最高的转换效率, Brosnan 等^[2]采用注入-锁定准分子激光系统实现了 XeCl/Pb 系统高达 50% 的转换效率。XeCl 准分子激光在铅蒸气中的受激电子喇曼散射使波长为 308 nm 的紫外光频移到波长为 459 nm 的蓝光, 其波长正好位于海水透射窗口, 在海洋光学及水下通讯方面有重要的应用价值。然而, 比较复杂的注入-锁定准分子激光系统在实际应用上不方便, 而用稳腔输出的准分子激光由于发射角较大而不能获得较高的转换效率, 在文献[3]中, 采用高能量准分子激光, 在稳腔情况下喇曼转换效率仅 18% 左右。本文报道在 XeCl 准分子激光采用非稳腔后, 使激光束发散角有数量级的减小, 大大提高了激光束的可聚焦功率密度, 在同时改善喇曼管加温均匀的基础上, 获得 52% 的高效率喇曼能量转换效率, 为高效率蓝绿光的获得提供了比较简单的技术途径。

二、实验装置及结果

实验装置与文献[3]采用的装置一样, 其区别在于所用的泵浦激光具有非稳腔结构。采用 $M=6$ 的望远镜式非稳腔, 其输出的光束截面为 $2.5 \times 2 \text{ cm}^2$, 中心处有一个 $\phi 5 \text{ mm}$ 左右的圆斑, 用小孔扫描法测量激光束的能量分布如图 1 所示, 呈比较均匀的分布。事实上由于扫描小孔的直径为 1 mm 左右, 真实的能量分布应该如图 1 中虚线所示。

为了与文献[3]的结果进行比较, 表 1 列出两种激光谐振腔下的激光输出特性以及采用焦距为 1.3 m 的透镜聚焦后, 焦点处的功率密度。

喇曼池是一根长约 170.0 cm 的不锈钢管, 采用改进的保温结构, 使喇曼管工作区的温

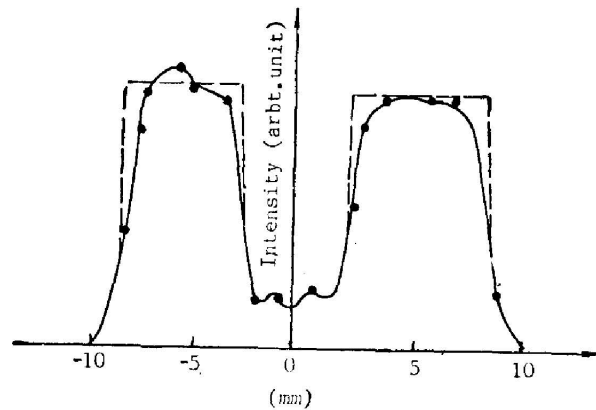


Fig. 1 Intensity spatial profiles of pumping beam with unstable resonator configuration.

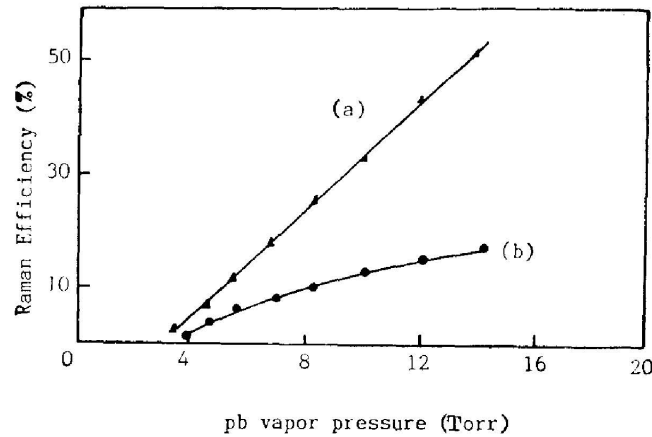


Fig. 2 Comparison of the efficiencies of the Stokes emission as a function of Pb vapor pressure between the pumping laser adopting (a) unstable resonator optics and (b) stable resonator optics

Table 1 Characteristics of the XeCl excimer lasers with two kinds of resonators

R_1	R_2	Cavity length L	Laser Energy E	Beam Spread Angle θ	Peak Power P	Power Intensity* P_i
(cm)	(cm)	(cm)	(mJ)	(mrad)	(MW)	(MW/cm ²)
∞	∞	100	660	2	11	160
300	-50	125	500	0.3	8	2000

* At the focus point with focal length of 130 cm.

度基本上保持均匀。由于在聚焦透镜及喇曼池窗口处的反射、吸收的损耗以及喇曼池孔径的限止,特别是非稳腔下良好的方向性会提高可聚焦功率而引起光学元件及膜层的破坏,本实验将喇曼池输出窗口处测得的泵浦光能量限止在 190 mJ 左右,此时池内不充气,且不加温,其相应的可聚焦功率密度(用 f 为 1.3 m 透镜)约为 800 MW/cm²。

采用两种谐振腔下,喇曼能量转换效率与铅蒸气压力之间的变化关系由图 2 给出。图中曲线(a)表示非稳腔情况,在喇曼池不充气情况下输出窗口处测得泵浦光能量为 190 mJ,而曲线(b)表示的平面平行腔情况,某实验条件下的泵浦光能量为 660 mJ。严格的对比应该使这两个能量相等,但如上所述,在高能非稳腔情况下,过高的能量会损坏光学元件及膜层;而在平面平行腔情况下,过低的能量处于受激电子喇曼散射阈值附近,不易获得可靠的数据。

从图 2 可见,曲线(a)表明喇曼转换效率随铅蒸气密度增大而线性增长,而对于平面平行腔,当铅蒸气压力增大时,转换效率的上升比较平坦。同时进行了改变泵浦光强度,研究不同泵浦功率密度对喇曼转换效率影响的实验。图 3 给出在喇曼池中心激光焦复处的功率密度变化对喇曼转换效率的影响,其中曲线表示非稳腔的实验结果,而左下方两个实验点表示平面平行腔的结果,表明二者能互相印证,关于泵浦功率密度的影响将在下一节中详细讨论。

从图 2 和图 3 可见,当铅蒸气喇曼管加热到本装置所允许的最高温度 1200°C 时,得到最大的转换效率相对于输出端能量计算效率为 52%。

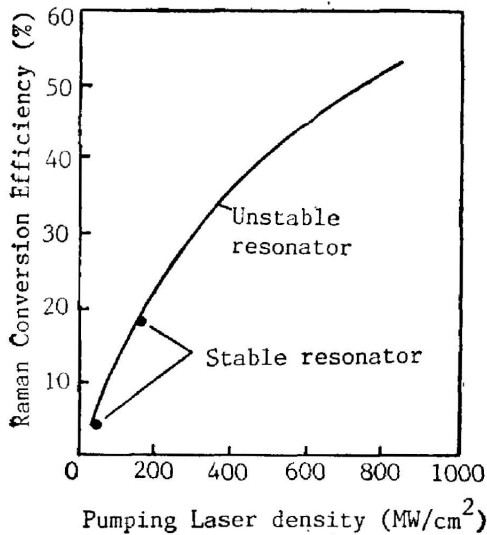


Fig. 3 Dependence of the Raman conversion efficiency on the pumping laser power intensity

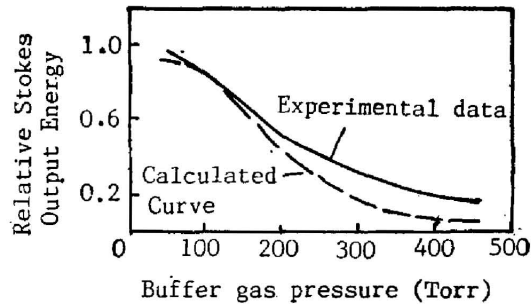


Fig. 4 Relative output energy of the Raman shifted radiation as a function of buffer gas pressure

在喇曼池中,一般要充入一些隋性气体作缓冲气体,随着缓冲气体压力的增加,斯托克斯光的能量下降。文献[3]在平面平行腔下研究了 He 气压力对斯托克斯输出的影响,本文在非稳腔下作了类似的实验研究,得到基本一致的实验结果,其结果由图 4 的实线给出。

三、分析和讨论

受激喇曼散射分共振及非共振型两种,由于铅原子基态到 $6p7s^3P_1$ 激发态的跃迁与波长为 308 nm 的 XeCl 准分子激光的光子能量处于近共振状态,其受激喇曼散射具有较高的增益。

根据喇曼散射的量子理论, 跃迁几率取决于

$$T_r \{ \hat{\rho} A_p^{(-)} A_s^{(+)} A_s^{(-)} A_p^{(+)} \} \approx \langle n_p \rangle (\langle n_s \rangle + 1), \quad (1)$$

式中 A_p 、 A_s 分别是泵浦光和斯托克斯光场的振幅, $\hat{\rho}$ 是系统的密度矩阵, $\langle n_p \rangle$ 和 $\langle n_s \rangle$ 分别是泵浦光和斯托克斯光的平均光子数, 它们与能流密度成正比, 对于受激喇曼散射, $\langle n_s \rangle \gg 1$, 因此, 斯托克斯光的增益可表达为

$$G \approx gN(\rho_i - \rho_f) \langle n_p \rangle g(h\Delta\nu), \quad (2)$$

式中 g 是喇曼增益系数, $N(\rho_i - \rho_f)$ 是喇曼介质原子基态与末态之间的粒子数密度差, $g(h\Delta\nu)$ 是喇曼跃迁联合态密度, 从(2)式可见, 喇曼增益正比于泵浦光的能流密度以及喇曼介质的密度 N 。图 2 中喇曼转换效率随铅蒸气压力(原子密度)的增加线性增加, 图 3 中低泵浦密度区域的线性关系都证实了上述分析。但是, 在图 3 中当泵浦功率密度大于 300 MW/cm^2 以后, 呈现一定的饱和趋势, 这时必须考虑喇曼增益的饱和现象。

对于高压氩中的受激喇曼散射, 我们曾用两只喇曼管进行斯托克斯光的振荡-放大实验, 并求得不同泵浦功率密度下的增益及饱和参量^[4], 对于铅蒸气可以用类似的手段来确定其饱和参量。

为了分析缓冲气体对斯托克斯输出的影响, 我们用计算机编码求解了喇曼散射方程组

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P_p}{\partial z} &= -\frac{\omega_p}{\omega_s} \frac{g}{S(z)} (P_1 - P_2) P_p P_s g(h\Delta\nu), \\ \frac{\partial P_s}{\partial z} &= \frac{g}{S(z)} (P_1 - P_2) P_p P_s g(h\Delta\nu), \\ \frac{\partial (P_1 - P_2)}{\partial \tau} &= -\frac{\partial g}{S^2(z)} \frac{(P_1 - P_2)}{n\hbar\omega_s} P_p P_s g(h\Delta\nu) + \frac{1 - (P_1 - P_2)}{T_1}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中各符号的意义见文献[5], 求得喇曼光能量相对值随碰撞加宽的线宽对斯托克斯输出的影响。在缓冲气体压力较低时, 喇曼散射谱线宽度由多普勒加宽决定, 当 He 气压力升高后, He 原子与铅原子的碰撞加宽起作用。将线宽折合成 He 气压力后, 其计算结果由图 4 中虚线给出, 它表明我们理论计算与实验结果基本上符合。

参 考 文 献

- [1] E. Burnham *et al.*; *Opt. Lett.*, 1978, **3**, No. 6 (Jun), 215.
- [2] S. J. Brosnan *et al.*; *Opt. Lett.*, 1982, **7**, No. 4 (Apr), 154.
- [3] 霍芸生, 楼祺洪等;《光学学报》, 1986, **6**, No. 10 (Oct), 880.
- [4] 楼祺洪等;《光学学报》, 1988, **8**, No. 6 (Jun), 509~513.
- [5] 霍芸生等;《光学学报》, 1987, **7**, No. 7 (Jul), 591.

High efficiency Raman conversion of XeCl laser radiation in Pb vapor

LOU QIHONG AND GU HONGPING

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 24 February 1988; revised 10 September 1988)

Abstract

Raman energy conversion efficiency as high as 52% was obtained in Pb vapor when the XeCl excimer pumping laser adopts the unstable resonator configuration. The characteristics of SERS in Pb vapor pumped by XeCl laser with unstable and stable resonators are compared.

Key words: stimulated Raman scattering; excimer laser.